

1nm サイズ分子素子伝導物性およびその制御

塚越一仁

独立行政法人理化学研究所 低温物理研究室

1. 研究のねらい

導電性有機分子は設計自由度が高く合成が可能であり、次世代あるいはその次の世代の電子素子材料として可能性を秘めており、分子1つあるいは分子薄膜の電気伝導の探索が進められている。単分子素子は、サイズの小さな高エネルギー効率スイッチ素子へ探求が目的であり、現行型スイッチ素子の延長では実現が難しいと考えられる夢の未来情報世界へのステップとなっていくことが望まれている。実際に、現行の半導体素子は大手CPU製造会社さえも指摘しているとおり、シングル・ゲートのプレーナ型トランジスタ構造のリーク電流増大は近い将来原子炉並みの発熱密度になるという試算さえもなされている。このような状況に対して、当然様々な現行素子の発展研究がなされているが、分子スケール素子の挑戦もこの1つである。一方で、分子薄膜を半導体薄膜としてトランジスタを作製すると、その電界効果移動度はアモルファスシリコントランジスタの電界効果移動度以上に達し、フレキシブルエレクトロニクスへの応用展開として、技術発展が強く必要とされている。これら2つの分子を使ったエレクトロニクス研究は、金属電極から分子に対して電子の出し入れの制御することが基本技術であり、正確に電極構造を作製し電極間に分子を捉えたうえで、電気伝導を評価することが必要である。現状は、これらの1つの基本技術へのアプローチに対して、分子エレクトロニクスと有機エレクトロニクスとしての別々のアプローチが進められているにとどまり、今後の発展には相互の技術展開が必要である。本研究では、この目的のために、単分子エレクトロニクスと有機エレクトロニクスの電極のナノメートルスケール界面制御の基礎を構築を進めた。

2. 研究の成果と考察

分子や有機薄膜を用いた素子においては、一般に電極は金が伝統的に広く使われている。金は微細加工しやすく表面変化が起こりにくいとされていることによる。さらに金のフェルミエネルギーが、測定対象である分子の最もエネルギーの高い軌道(最高被占軌道、Highest Occupied Molecular Orbital、HOMO)に近い薄膜や分子を測定対象とすることが多いことにも因る。

しかし、実際に数 nm 間隔を有する金電極を微細加工で作製し、ペンタセンやフラーレンなどの有機薄膜を真空蒸着しても単純には電気伝導が得られないことも多い。これは金電極と有機材料と

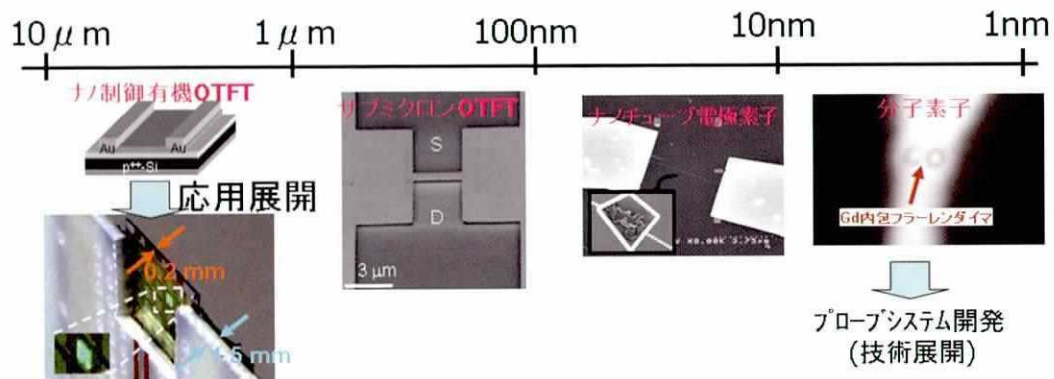


図1 本研究では、様々な素子スケールのナノスケール界面に注目し、分子あるいは分子薄膜を使った素子作製法の工夫と電気伝導評価を行った。フラーレンダイマーやナノチューブ電極を用いた有機微結晶伝導測定、および有機薄膜トランジスタおよびその短チャネル化の制御を試みた。

の界面は上記の単純な組み合わせで決まっているわけではなく、材料間の表面エネルギー差に基づく濡れ性なども密接に関わっているからである。実際に、数 10 ミクロンサイズのペンタセン薄膜トランジスタを電極が薄膜下となる配置で作製した場合、金電極と基板のつなぎ目において有機薄膜が連続的につながらないことも良く起こる。分子などを取り扱った多くの研究では、このような基本的な問題の解決があやふやであり、観測された現象の理解が難しい。この点において、先ず重要となるのが測定の対象となる分子あるいは分子材料に対して、適した電極を精密に作製し構造的および電気的にスムーズな接続を作製することが重要である。この点と同時に、評価方法の開発も再現性の高い研究を進めるために極めて重要な課題である。本研究ではこれらの点に注意して、上記スケールに示す幾つかの素子を対象となる材料に適した材料で電極を作製し、電気伝導を評価をすすめた(図 1)。分子素子では、分子内部に金属原子を有し伝導性の高い Gd 内包 C_{82} に対して、炭化タングステンを主原料とする電極を作製することで、分子伝導を評価することに成功した。この電極作製においては、トンネル伝導を評価しながらギャップを作製する方法を提案し、再現性良く試料を作れる方法を実現した(図 2)。有機薄膜トランジスタにおいては、先ず電極端子の 4 端子精密計測のための薄膜レーザー加工法を実現し、端子の評価を基にして、電極界面のナノスケール制御法を確立した(図 3)。また、これを応用して短チャネル有機薄膜トランジスタの制御に現在では取り組んでいる。また、カーボンナノチューブを電極とした自己組織化有機薄膜短チャネルトランジスタも初めて実現することに成功した。

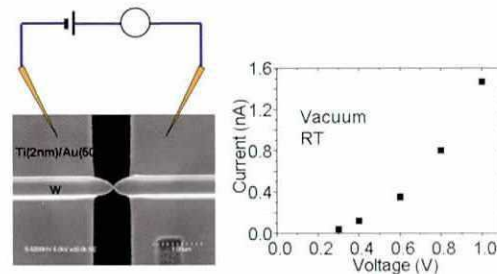


図2 収束イオンビームにタングステンヘキサカーボニールガスを導入して、ナノギャップ電極を作製する方法を提案し、確立した。このギャップ作製時の課題である構造の再現性に関して、真空チャンパー内でトンネル電流を計測することで極めて高い確率での作製率にすることが出来た。

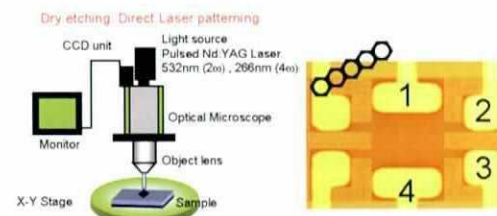


図3 有機薄膜に対するレーザーパターンニング法を提案し実現した。この方法では、有機薄膜への加工ダメージを入れることなく試料を作製できる。これによって有機薄膜の基礎物性評価(端子精密評価やホール効果評価)を初めて可能とした。

3. 主な発表

- 論文: 1. K. Tsukagoshi, K. Shigeto, I. Yagi, and Y. Aoyagi, APL 89, 113507 (2006).
 2. K. Tsukagoshi, I. Yagi, K. Shigeto, K. Yamagisawa, J. Tanabe, and Y. Aoyagi, APL 87, 183502 (2005).
 3. I. Yagi, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, APL 86, 103501 (2005).
 4. I. Yagi, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, APL 84, 813 (2004).
 5. A. Yu. Kasumov, K. Tsukagoshi, M. Kawamura, T. Kobayashi, Y. Aoyagi, K. Senba, T. Kodama, H. Nishikawa, I. Ikemoto, K. Kikuchi, V. T. Volkov, Yu. A. Kasumov, R. Deblock, S. Guéron, and H. Bouchiat, PRB 72, 033414 rapid communication (2005).

など計 18 報。

招待講演: K. Tsukagoshi, The 2005 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Hawaii, USA, December, 2005 など国際会議招待講演計 11 件、国内学会招待講演計 7 件。

特許出願: 5 件